

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Ivan Križanović

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Mentor:
Prof.dr.sc.Tanja Jurčević Lulić, dipl. ing.

Student:
Ivan Križanović

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Srdačno se zahvaljujem mentorici rada prof.dr.sc. Tanji Jurčević Lulić na stručnim savjetima i pomoći koju mi je pružila tijekom izrade ovog završnog rada.

Ivan Križanović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Križanović**

Mat. br.: 0035188314

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispune zuba u dentalnoj biomehanici**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Intracoronaral restoration in dental biomechanics**

Opis zadatka:

Potrebno je opisati način i materijale ispune zuba u stomatologiji te sile koje se ostvaruju između ispune i zuba. Pretpostaviti cilindričan oblik šupljine zuba, te izračunati silu pritiska ispune na zub (dentin) primjenom 3D modela. Izračun provesti za dvije vrste ispuna: amalgam i akrilnu smolu. U obzir uzeti promjenu volumena ispune na mjestu zuba zbog promjene temperature 45°C. Prikazati silu pritiska u ovisnosti o visini šupljine zuba ($h = 1$ do 5 mm).

Zadano:

- polumjer šupljine zuba $r = 3$ mm,
- modul elastičnosti amalgama $E_{am} = 27$ GPa, modul elastičnosti akrilne smole $E_{as} = 2,5$ GPa, modul elastičnosti zuba (dentina) $E_d = 20$ GPa;
- koeficijenti toplinskog rastezanja amalgama, akrilne smole i zuba (dentina) $\alpha_{am} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{as} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_d = 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- Poissonov faktor za amalgam i akrilnu smolu $\nu = 0,33$.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Tanja Jurčević Lulić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK RADA.....	VI
SUMMARY	VII
1 UVOD.....	1
2 ZUBI	2
2.1 Građa zubi.....	2
2.2 Mliječni zubi.....	3
2.3 Trajni zubi.....	4
2.4 Vrste zubi.....	4
2.4.1 Sjekutići	4
2.4.2 Očnjaci	5
2.4.3 Pretkutnjaci	5
2.4.4 Kutnjaci.....	5
3 MATERIJALI ISPUNE ZUBA U STOMATOLOGIJI	6
3.1 Dentalni amalgam.....	6
3.1.1 Podjela amalgamskih slitina	7
3.1.2 Svojstva dentalnog amalgama	7
3.2 Kompozitni materijali.....	8
3.2.1 Organska smolasta matrica	9
3.2.2 Anorgansko punilo.....	10
3.2.3 Međugranično vezivno sredstvo	11
3.2.4 Ostale komponente	11
3.2.5 Vrste dentalnih kompozitnih materijala.....	11

4	NAČIN ISPUNE ZUBA U STOMATOLOGIJI	12
4.1	Postupak izrade ispuna	12
4.1.1	Amalgamski ispun	12
4.1.2	Kompozitni ispun.....	13
4.2	Nakon izrade ispuna	14
4.3	Zamjena starih ispuna	14
5	ANALITIČKI MODEL	15
5.1	Hookeov zakon za prostorno (troosno) stanje naprezanja tijela.....	15
5.2	Izračun sile pritiska ispune amalgama na zub	17
5.3	Izračun sile pritiska ispune akrilne smole na zub	18
5.4	Rezultati.....	19
6	ZAKLJUČAK	21
7	LITERATURA	22

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz gornjeg zubnog luka i donjeg zubnog luka	2
Slika 2. Anatomija zuba [5]	2
Slika 3. Mliječni zubi [6]	3
Slika 4. Zubi u odrasla čovjeka [8]	4
Slika 5. Primjer dentalnog amalgama [12]	8
Slika 6. Organske matrice dentalnih kompozita [5]	10
Slika 7. Primjer ispune od a) kompozitnog materijala [21], i b) dentalnog amalgama [22]	14
Slika 8. Skica zuba s ucrtanim kordinatnim osima	15
Slika 9. Grafički prikaz promjene sile pritiska ispune na zub ovisno o duljini šupljine zuba za amalgam i akrilnu smolu	20

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sile pritiska ispuna amalgama i akrilne smole na zub.....	19
--	----

POPIS OZNAKA

r	polumjer šupljine zuba	mm
E_{am}	modul elastičnosti amalgama	GPa
E_{as}	modul elastičnosti akrilne smole	GPa
E_d	modul elastičnosti dentina	GPa
α_{am}	koeficijent toplinskog rastezanja amalgama	K ⁻¹
α_{as}	koeficijent toplinskog rastezanja akrilne smole	K ⁻¹
α_d	koeficijent toplinskog rastezanja dentina	K ⁻¹
h	duljina šupljine zuba	mm
ν	Poissonov faktor	-
F	sila	N
t	debljina stijenke zuba	mm
L	visina zuba	mm
R	polumjer zuba	mm
σ_{is}	normalno naprezanje ispune	MPa
σ_d	normalno naprezanje zuba	MPa
ε_{is}	deformacija ispune	MPa
ε_d	deformacija zuba	MPa
ΔT	promjena temperature	°C

SAŽETAK RADA

U ovom radu opisani su način i materijali ispuna zuba u stomatologiji. Razmatrane su dvije vrste ispuna: amalgam i akrilna smola. Također, opisane su i sile koje se ostvaruju između ispune i zuba. Uz pretpostavku cilindričnog oblika šupljine zuba, te zadanih vrijednosti (polumjer šupljine zuba $r = 3\text{ mm}$, modul elastičnosti amalgama $E_{am} = 27\text{ GPa}$, modul elastičnosti akrilne smole $E_{as} = 2,5\text{ GPa}$, modul elastičnosti dentina $E_d = 20\text{ GPa}$, koeficijent toplinskog rastezanja amalgama $\alpha_{am} = 25 \cdot A = \pi r^2 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, koeficijent toplinskog rastezanja akrilne smole $\alpha_{as} = 2,5 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, koeficijent toplinskog rastezanja dentina $\alpha_d = 11 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, Poissonov faktor za amalgam i akrilnu smolu $\nu = 0,33$) primjenom 3D modela izračunata je sila pritiska ispune na zub i to za obje vrste ispuna. U obzir je uzeta duljina šupljine zuba ($h = 1\text{ do }5\text{ mm}$) kao i promjena volumena ispune na mjestu zuba zbog promjene temperature 45°C .

Ključne riječi: ispune zuba, amalgam, akrilna smola, sila pritiska između ispune i zuba.

SUMMARY

This article describes method and teeth filling materials in dentistry. Two types of fillings are discussed: amalgam and acrylic resin. Also, here are described forces between the filling and tooth. Assuming cylindrical tooth cavity and the default values: (cavity tooth radius $r = 3$ mm, elastic modulus of dental amalgam $E_{am} = 27$ GPa, elastic modulus of acrylic resin $E_{as} = 2,5$ GPa, elastic modulus of dentin $E_d = 20$ GPa, coefficient of thermal expansion for amalgam $\alpha_{am} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, coefficient of thermal expansion for acrylic resin $\alpha_{as} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, coefficient of thermal expansion for dentin $\alpha_d = 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Poisson's ratio for amalgam and acrylic resin $\nu = 0,33$) using the 3D model, the force of pressure on the tooth and filling is calculated for both types of filling. They consider the tooth cavity length ($h = 1-5$ mm) as well as the tooth fill volume change, due to the change of temperature of 45°C .

Keywords: tooth fillings, amalgam, acrylic resin, compressive force between the filling and the tooth

1 UVOD

Zubi (lat. *dens, dentis*, grč. δόντι) su kalcificirani organi koji se nalaze u usnoj šupljini, a njihov položaj u čeljusti i njihov oblik određen je genetskom determinantom, ravnotežom sila mišića obraza i jezika, silama žvakanja te različitim silama koje djeluju tijekom rasta i razvoja [1].

S obzirom da zubi sudjeluju u hranjenju, učestala je pojava kvarenja zubi, uzrokovana plakom koji proizvode bakterije u usnoj šupljini. Ukoliko se odmah ne tretira, stanje se može pogoršati i nastati rupa u zubu. Zubno tkivo oštećeno karijesom ne može se regenerirati, već se jedino može ukloniti i nadomjestiti odgovarajućim materijalima, u obliku zubnog ispuna ili krunice. Zubni ispuni su najčešći stomatološki zahvati, a mogu biti izrađeni od amalgama (srebrna ili siva plomba) ili od kompozita (bijela plomba) [2].

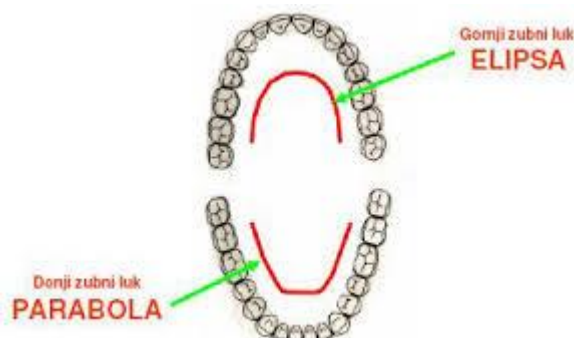
U slučaju oštećenja zuba karijesom, puknuća (frakture) zuba ili određenih estetskih nepravilnosti potrebno je napraviti kompozitni ispun (bijelu plombu) [3].

2 ZUBI

Zubi su kalcificirani organi, koji se nalaze na početku probavnog trakta, u usnoj šupljini, a prvenstveno služe usitnjavanju hrane.

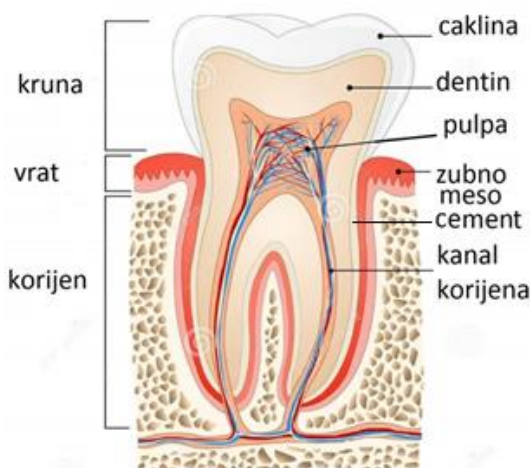
2.1 Građa zubi

Postavljeni u gornjoj i donjoj čeljusti, zubi čine dva paralelna parabolično zavijena luka: *arcus dentalis* (gornji zubni luk) i *arcus dentalis inferior* (donji zubni luk).



Slika 1. Prikaz gornjeg zubnog luka i donjeg zubnog luka

Dio zuba koji slobodno strši u usnu šupljinu je kruna zuba, a dio koji se nalazi u kosti je korijen zuba. Dio koji se nalazi između krune i korijena, a pokriven je sluznicom, nazivamo vrat zuba (Slika 2) [4].



Slika 2. Anatomija zuba [5]

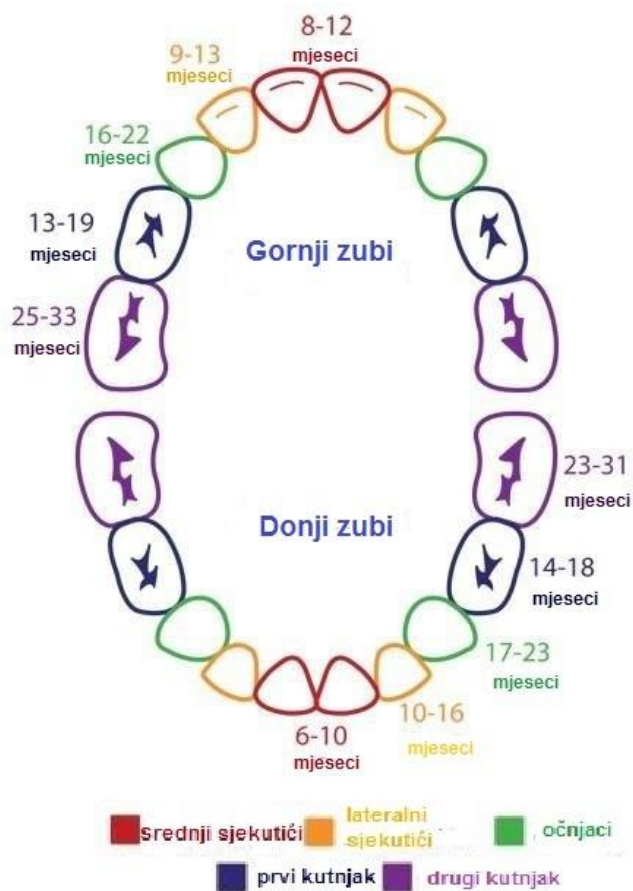
Kruna zuba (lat. *coronadentis*) je dio vidljiv u usnoj šupljini, a označava se s dva termina: anatomska i klinička kruna. Anatomska kruna je dio zuba prekriven caklinom. Nije vidljiva u potpunosti, jer joj vratni dio prekrivaju desni. Klinička kruna je vidljivi dio zuba i može, ali ne mora, odgovarati anatomske kruni. Klinička se kruna obično mijenja tijekom života, uslijed npr. resorpcije okolnog koštanog tkiva, povlačenja gingive (zubno meso) i slično [1]. Kruna je građena od cakline, koja štiti i obavlja unutarnji dio zuba – dentin, koji je osjetljiviji i mekaniji.

Vrat zuba (lat. *collum s. cervixdentis*) je suženje na granici cakline i cementa, u obliku plitkog žlijeba (cervikalna linija ili caklinsko-cementni spoj) i u fiziološkim uvjetima je prekriven sluznicom usta. Između zuba i sluznice nalazi se uzak prostor dubine do 1,5mm koji se naziva fiziološki džep [1].

Korijen zuba (lat. *radixdentis*) također je označen s dva termina. Anatomski korijen je dio zuba prekriven cementom i usađen u zubnu jamicu (alveolu). Klinički korijen je onaj dio zuba koji se ne vidi u ustima i može, ali ne mora, odgovarati anatomskom korijenu. Broj i veličina korijena varira od zuba do zuba. Zube dijelimo na jednokorijene (sjekutići, očnjaci, pretkutnjaci -osim gornjeg prvog pretkutnjaka), dvokorijene (prvi pretkutnjak i svi donji kutnjaci) te trokorijene zube (gornji kutnjaci) [1].

2.2 Mliječni zubi

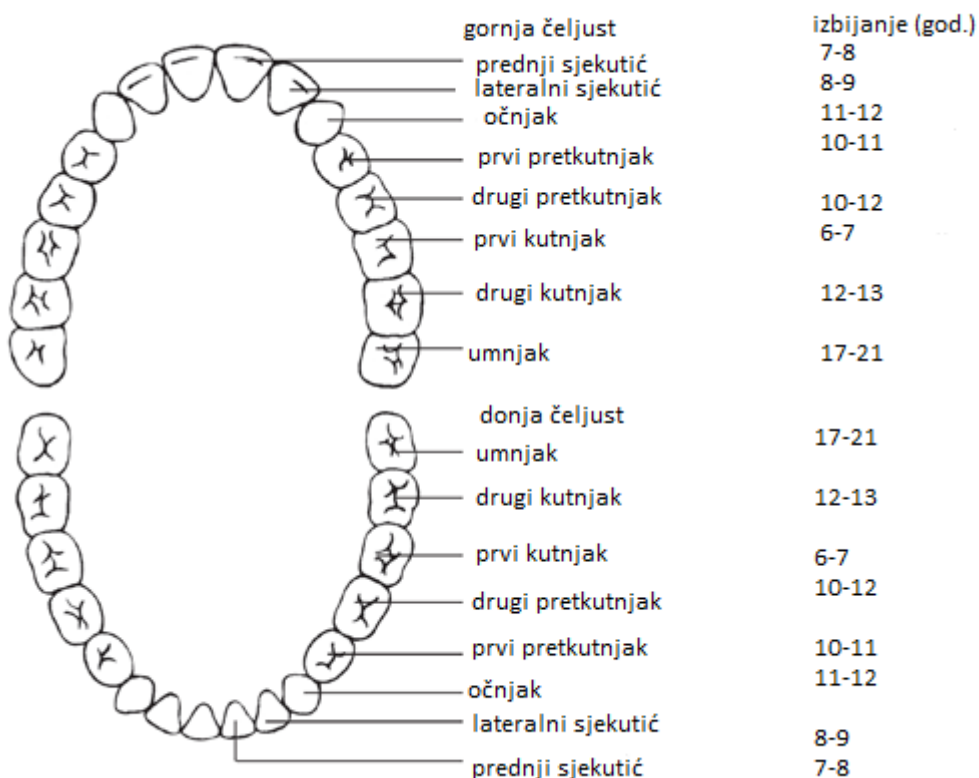
Nicanje mliječnih zubi (mliječne denticije) počinje između četvrtog mjeseca starosti djeteta i prve godine života. Najčešće se to dogodi kad je djetetu 6 mjeseci, te su to mliječni zubi (Slika 2.). U normalnim uvjetima imamo 20 mliječnih zubi (8 sjekutića, 4 očnjaka, 4 prva kutnjaka i 4 druga kutnjaka). Prednji (srednji) sjekutići niču prvi, zatim postranični (lateralni) sjekutići, slijede prvi kutnjaci, zatim očnjaci i na kraju, u dobi od 20 do 30 mjeseci, drugi kutnjaci. Često se pogrešno misli da mliječni zubi nisu tako važni jer će ih zamijeniti trajni te se stoga ne mora voditi previše računa o njihovu izgledu i zdravlju. To nije točno, jer su zdravi mliječni zubi preduvjet za pravilan rast zdravih zuba.



Slika 3. Mliječni zubi [6]

2.3 Trajni zubi

Prvi trajni zub – donji prvi trajni kutnjak, „šestica“ niče u šestoj godini života. U tom razdoblju mliječna denticija prelazi u mješovitu, jer su istovremeno prisutni i mliječni i trajni zubi. Gornji prvi trajni kutnjak niče unutar dvije godine od nicanja donjeg prvog trajnog kutnjaka, a zatim se ostali mliječni zubi polako počinju zamjenjivati trajnima. Trajni zubi resorbiraju korijene mliječnih prethodnika, pri čemu se mliječni zubi rasklimaju i sami ispadnu, ili ih doktor dentalne medicine izvadi bez poteškoća. Na mjesto mliječnih zubi dolaze njihovi trajni nasljednici, tako da se prvo zamjenjuju donji prednji zubi, a potom slijede gornji prednji te kasnije stražnji zubi (Slika 4). Slijedi razdoblje trajne denticije koje traje čitav život. Nicanje se nastavlja tako da oko dvanaeste godine niknu drugi trajni kutnjaci, a između sedamnaeste i dvadesetpete godine nikne zadnji trajni zub – treći trajni kutnjak, „osmica“. Međutim, učestala je pojava da treći trajni kutnjak uopće ne nikne; razlozi su u nepostojanju zametka ovog zuba ili nepovoljnu smještaju zuba u alveolarnoj kosti koji mu ne dopušta nicanje. Obje pojave su prilično česte, a nedostatak trećeg trajnog kutnjaka ne uzrokuje nikakve smetnje. Potpuno razvijena trajna denticija sastoji se od 32 zuba: 8 sjekutića, 4 očnjaka, 8 pretkutnjaka i 12 kutnjaka [7].



Slika 4. Zubi u odrasla čovjeka [8]

2.4 Vrste zubi

2.4.1 Sjekutići

Sjekutići su smješteni sprijeda, ima ih osam, po četiri u svakoj čeljusti. Imaju jedan korijen oblika konusa, spljoštenog u smjeru lateralno – medijalno, stoga na njemu možemo

razlikovati medijalnu i lateralnu površinu na čijim sredinama se katkad može nalaziti jedna vrlo plitka brazda.

Kod zagriža, gornji zubi ne prekrivaju točno donje zube. Gornji zubi imaju širu krunu od donjih, stoga jedan gornji zub pokriva jedan cijeli donji zub i još polovinu susjednog zuba. Svi su sjekutići međusobno različiti [4].

2.4.2 Očnjaci

Očnjaci su dulji od sjekutića. Ima ih četiri, po dva u svakoj čeljusti. Gornji su očnjaci veći od donjih. Na kruni očnjaka razlikujemo slobodan rub i četiri površine: *facieslingualis*, *labialis*, *medial* i *lateral*.

Očnjaci imaju jedan korijen, u obliku konusa, malo spljošten u stranu s obzirom na medio-sagitalnu ravninu, s uzdužnim žlijebom. Zavijen je prema lateralnoj strani. Donji očnjak može imati dva korijena. Korijen gornjih očnjaka je tako dug da seže do razine dna nosne šupljine, ali kako je smješten nešto lateralno, ne dopire u nju [4].

2.4.3 Pretkutnjaci

Pretkutnjaci su razvijeni samo u trajnom zubalu, nema ih kod mliječnih zubala, a na njihovom su mjestu kutnjaci. Ima ih osam, po četiri u svakoj čeljusti. Gornji pretkutnjaci veći su od donjih.

Korijen je obično spljošten u smjeru naprijed-natrag, te ima žlijebove na prednjoj i stražnjoj strani. Prvi gornji pretkutnjak obično ima dva korijena. Jedan leži lateralno, a drugi medijalno. Drugi gornji pretkutnjak također može imati dva korijena [4].

2.4.4 Kutnjaci

Kutnjaka ima dvanaest, po šest u svakoj čeljusti. Veličina kutnjaka se smanjuje od prvog prema trećemu. Gornji kutnjaci su manji od donjih. Kruna ima oblik romba, dok je donjima kruna u obliku kvadrata. Gornji zubi imaju smjer ukoso prema dolje i van, a donji prema gore i unatrag [4].

3 MATERIJALI ISPUNE ZUBA U STOMATOLOGIJI

Ispun nadomješta tvrdo zubno tkivo zuba koji je oštećen karijesom ili je slomljen. Do prije deset godina najčešće su se koristili dentalni amalgami, a danas se najčešće koriste kompozitni materijali.

3.1 Dentalni amalgam

Dentalni amalgam slitina je žive s jednom ili više kovina (srebro, kositar, bakar i dr.). Naziv amalgam potječe od grčkih riječi: *a* = ne i *malagma* = smekšanje. Najranije se, u nekom obliku, spominje tijekom vladavine kineske dinastije Tang (607.- 901.g.), dok je za prvu moderniju upotrebu s usavršenijim amalgamom zaslužan njemački liječnik Johann Stocker, koji je amalgamu dodijelio i ime [9]. Tijekom 19 i 20. stoljeća, brojni su znanstvenici provodili istraživanja vezana uz sastav dentalnog amalgama kako bi ga unaprijedili. Velik doprinos dao je Greene Vardiman Black, koji je krajem 19. stoljeća uočio kako na stvrdnjavanje, ekspanziju i kontrakciju dentalnog amalgama utječe upravo sastav samog amalgama, ali i način rukovanja njime. Mnogobrojna istraživanja u konačnici su rezultirala *ADA (American Dental Association) specifikacijom No 1*, koju je objavio Nacionalni ured za standarde u Sjedinjenim Američkim Državama 1929. godine. Njime se, po prvi puta, omogućila standardizaciju dentalnih amalgama, kao i njihovo unaprjeđenje korištenjem raznih testova kojima se određivao sastav i svojstva amalgama. Prema kasnijoj nadopuni te specifikacije iz 1977.godine, dentalni amalgam u svojim temeljima morao je imati srebro, kositar i živu, dok se u manjim količinama moglo dodati zlato, bakar i cink.

Zbog svojih svojstava, dugo vremena je slovio kao najčešće upotrebljavani materijal za ispun stražnjih zubi. Prednosti dentalnog amalgama su: iznimna otpornost naspram djelovanja žvačnih sila, jednostavna primjena u ambulantnim uvjetima i pristupačna cijena. Nedostaci dentalnog amalgama su: opsežnost brušenja zdravog tkiva radi zadržavanja amalgamskog ispuna, neprirodnost njegove boje i moguća toksičnost zbog velikog udjela žive u sastavu ove slitine.

Temeljni kemijski sastojci dentalnih amalgama su živa (Hg), kositar (Sn) i srebro (Ag). U manjim količinama slitini mogu biti dodani bakar (Cu), cink (Zn), zlato (Au), platina (Pt), paladij (Pd), nikal (Ni), molibden (Mo) te volfram (W) [10].

Srebro pridonosi sveukupnoj otpornosti ispuna, smanjuje razlijevanje dijelova ispuna i deformaciju zbog djelovanjapritiska kod zagriža (okluzije), olakšava rukovanje amalgamom i usklađuje širenje volumena. Kositar zauzima $\frac{1}{4}$ amalgamske slitine. Smanjuje mehaničku otpornost i širenje amalgama, a povećava razlijevanje amalgama. Bakar je količinski zastupljen u nekonvencionalnim amalgamskim slitinama (2-4% zastupljenosti). Pridonosi tvrdoći i otpornosti i sprječava pojačanu ekspanziju amalgama u kavitetu. Cink neutralizira štetne utjecaje stranih stvari, uzrokuje zakašnjelu ekspanziju amalgamskih ispuna. Živa je tekuća kovina, mora biti vrlo čvrsta, bez ikakvih štetnih primjesa. Ukoliko se u slitini nalazi više od propisane količine žive, dolazi do veće ekspanzije, povećanog razlijevanja amalgama i smanjene otpornosti na mehaničke utjecaje. Manjak žive pak uzrokuje smanjenu plastičnost, veću poroznost, manju otpornost na tlak i sklonost koroziji i kontrakciji. Stoga je optimalna količina žive propisana na 5%. *Specifikacija 6 ADA* propisuje da živa mora imati široku, zrcalno glatku površinu bez filma i ne više od 0,02% hlapljivog ostatka.

3.1.1 Podjela amalgamskih slitina

Morfološke skupine amalgamske slitine važne su zbog sposobnosti kondenzacije, a otpornost amalgamske slitine na kondenzaciju ovisi o obliku srebrnog praška. Po načinu proizvodnje srebrnog praška i obliku čestica, amalgamske slitine možemo podijeliti u četiri skupine: strugotinaste, kuglaste, pakuglaste lisnate i pomiješane slitine. Strugotinaste se slitine sastoje od oštih strugotina i krhotina različite veličine i oblika, a nastaju struganjem srebrnih šipki pomoću rotirajućeg reznog tijela [9]. Kuglaste slitine se sastoje od kuglica različite veličine. Pakuglaste i lisnate slitine se sastoje od elipsastih i plošnih čestica koje nastaju tijeljenjem kuglastih čestica. Pomiješane slitine nastaju kombinacijom svih oblika čestica. Strugotinasti, pakuglasti i mješoviti tip čestica pokazuju visok stupanj kondenzacijske otpornosti, zbog čega su prikladni za ispune koji podliježu djelovanju manjeg okluzijskog opterećenja. Za razliku od njih, okruglasti tip pokazuje nizak stupanj kondenzacijske otpornosti.

Prema količinskom udjelu bakra, dentalne amalgame možemo podijeliti na konvencionalne i amalgame s visokim udjelom bakra [9]. Konvencionalni dentalni amalgami sadrže do 3% bakra i pri njihovom spajanju u fazi kristalizacije, nastaje spoj kositra i žive, poznatiji kao γ_2 faza, koja je odgovorna za manjak čvrstoće i pojavu korozije. S druge strane, dentalni amalgami s visokim udjelom bakra (15-30%) potpuno uklanjaju tu γ_2 fazu. Višestruko su otporniji na deformaciju i manje se razlijevaju od konvencionalnog amalgama.

3.1.2 Svojstva dentalnog amalgama

Dentalni amalgami moraju, prema ADA *specifikacijom No 1*, kao mjeru kakvoće zadovoljavati tri fizikalna svojstva [13]. Prvo je svojstvo tečenja, odnosno tlačne deformacije amalgama tijekom vremena, koje se izražava u postocima (dopušteno izduženje iznosi najviše 3 %). Slijedi svojstvo promjene dimenzija. Dopuštena promjena dužine može iznositi između -10 i $+20 \mu\text{m}/\text{cm}^3$ tijekom 24 sata. Zbog otapanja žive u prvih 20 minuta dolazi do kontrakcije, a zatim i ekspanzije dentalnog amalgama te nakon 6-8 sati dimenzije amalgama postaju konstantne. Treće svojstvo je svojstvo tlačne čvrstoće koja mora iznositi 80 MPa nakon jednog sata. Na nju mogu utjecati razni čimbenici, poput: nedostatne amalgamacije, korozije, visokog udjela žive, nedostatno zbijenog amalgama i sporog stavljanja ispuna, zbog čega se otpornost na tlak može smanjiti.

Od ostalih svojstava, bitna je i korozijska postojanost, s obzirom na to da su amalgami u usnoj šupljini izloženi kemijskim, biološkim, mehaničkim, električnim i toplinskim djelovanjima. Od navedenih, najutjecajnije su sile elektrokemijske korozije i mehaničke sile, odnosno njihovo sinergijsko djelovanje [9]. One mogu promijeniti oblik zuba, kakvoću površine, sastav i svojstva amalgama. Korozija, zbog kemijskih reakcija i elektrokemijskih zbivanja, oštećuje površinski i potpovršinski sloj amalgama. Time ga oslabljuje, jer je podložniji trošenju djelovanjem mehaničkih sila. S obzirom na to da je amalgam otporniji na tlak, a slabiji na savijanje i vlak. Stoga kavitet mora biti oblikovan da su ispuni uglavnom izloženi silama tlaka, a ne vlaka ili savijanja. Međutim, kada je dentalni amalgam izložen neprekidnim tlačnim silama, ima sklonost tečenja ili pucanja. Još jedno od svojstava je i dobra toplinska provodljivost dentalnog amalgama, zbog čega se pulpa i dentin moraju zaštititi odgovarajućim sredstvima.

Dentalni amalgami potencijalno su toksični zbog elementarne žive koja se rabi pri njihovoj izradi [11]. Štetni utjecaj može biti lokalni, u usnoj šupljini, ili sustavni, ovisno o mogućnosti prodora otpuštenih sastojaka iz materijala u organizam, odnosno o stupnju njihove resorpcije. Od lokalnih simptoma, u svezu s dentalnim amalgamom, dovode se

glavobolja, slaba koncentracija, umor, tromost, pečenje jezika i metalni okus u ustima. Premda nije znanstveno dokazano, mogućnost prolaska žive kroz placentu i multipla skleroza se također navode kao posljedice dugotrajnog podražaja amalgamskih ispuna. Prema istraživanjima, od ukupnog postotka žive u organizmu čovjeka, amalgamski ispuni iznose tek 10-15% te 99,98% ispitanika koji imaju amalgamski ispun ne osjećaju simptome trovanja ili alergije. Alergijske reakcije i preosjetljivost na živu koja se manifestira kožnim reakcijama i oteklinama iznimno su rijetke, pa je u proteklih 150 godina, koliko je amalgamski ispun u široj upotrebi, zabilježeno tek nekoliko slučajeva.

Prednosti su dentalnih amalgama njihova niska trošivost, otpornost na djelovanje tlačnog opterećenja, niska cijena i jednostavno rukovanje. No imaju i nekoliko nedostataka, kao što su korozija, opasnost od toksičnog djelovanja žive, nemogućnost vezivanja za tvrda zubna tkiva te neestetski izgled [13]. Upravo su te negativne strane uzrokovale pad zanimanja za dentalne amalgame i usmjerile restaurativnu stomatologiju u potragu za materijalom koji svojim svojstvima može zamijeniti amalgame, a k tome još ispuniti i estetske zahtjeve (Slika 4.) [10].



Slika 5. Primjer dentalnog amalgama [12]

3.2 Kompozitni materijali

Kompozit se definira kao kombinacija dvaju ili više kemijski različitih materijala s jasnim graničnim spojem između komponenti te svojstvima boljim od pojedinačnih komponenti. Za razliku od amalgamskog ispuna, ovaj materijal u potpunosti je nemetalan, sposoban vezati se za tvrdo zubno tkivo, toplinski je inertan te zadovoljava estetske kriterije. Stezanje tijekom polimerizacije i posljedično nastajanje rubne pukotine te složenost izrade, njegovi su nedostaci. Istraživanje provedeno na Stomatološkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu o pojavnosti sekundarnog karijesa pokazala je da se kod ispuna starih 3 godine sekundarni karijes pojavljuje u 55% slučajeva, kod onih koji su stari sedam godina u 76% slučajeva, a onih starih 10 godina i više kod gotovo svih ispuna (97%) [13].

Zbog promjenjivih uvjeta u usnoj šupljini kompoziti moraju imati odgovarajuća svojstva. Slina ima pH vrijednost od 4 do 8,5, dok se unošenjem hrane i pića, taj pH lako može promijeniti. Također, ovisno o otvaranju usta i vanjskoj temperaturi temperatura u usnoj šupljini varira od 32 i 37° C, dok unošenjem različite hrane i pića, može dosegnuti raspon od 0-70° C. Bitna svojstva pri odabiru kompozitnog materijala koja određuju njegovu vrijednost, odnosno trajnost su: tvrdoća, savojna, rastezna i torzijska čvrstoća, elastičnost, trošenje, toplinska i električna provodnost, polimerizacijsko stezanje, hidropsko (djelovanjem vode) i toplinsko širenje [13]. Mehanička svojstva poput tvrdoće, čvrstoće i elastičnosti moraju zadovoljavati iste norme kao i dentalni amalgami te je poželjno da budu što viša. Poželjne su što manje vrijednosti trošenja, toplinske i električne provodnosti, polimerizacijskog stezanja te toplinskog širenja. Stezanje tijekom polimerizacije može se izbjeći dodavanjem ekspandirajućih monomera, odnosno višefunkcijskih cikličkih oligomera kao što su

spiroortoesteri i ciklički akrilati. Toplinsko širenje kompozitnih smola zbog stalnih temperaturnih promjena u usnoj šupljini čvrsto je povezano i s polimerizacijskim stezanjem, a ovisi o koeficijentu toplinskog širenja materijala. Hidropsko širenje javlja se kada materijal apsorbira vodu iz usne šupljine, što uz širenje materijala dovodi do pojave rubnog obojenja i pukotina koje omogućuje propuštanje mikroorganizama prema zubnoj pulpi [14].

Kompozitni materijali sastoje se od tri dijela: organske smolaste matrice, anorganskih čestica punila i međugraničnog vezivnog sredstva. U sastavu kompozita su i stabilizatori boje, inhibitori, pigment i aktivatorski sustav [15].

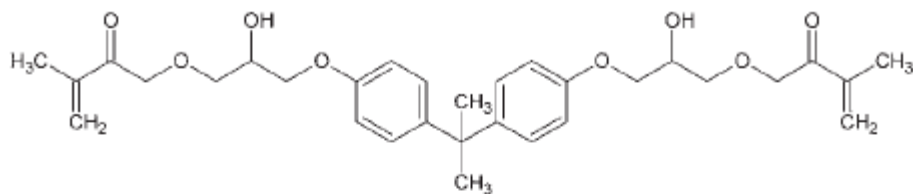
3.2.1 Organska smolasta matrica

Organska smolasta matrica je monomer koji se temelji na bisfenol-A-glicidil metakrilatu (Bis-GMA) ili dimetakrilatnim monomerima (DMA) (Slika 5.). Velike je molekularne mase te je to najvažniji sastojak kompozitnog materijala.

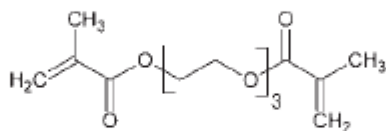
Aromatski bisfenol-A-glicidil-dimetakrilat (Bis-GMA) visoke viskoznosti otkrio je Rafael L. Bowen u 1960-ima, pa se naziva i Bowenova smola [13]. Zbog svoje visoke viskoznosti, u Bis-GMA matricu potrebno je dodati niskomolekulske monomere poput trietilenglikol dimetakrilata (TEGDMA) koji ih, zbog svoje niske viskoznosti, razrjeđuju, olakšavaju unakrsno povezivanje monomera i u konačnici definiraju konačnu čvrstoću. Osim velike viskoznosti, nedostatak Bowenove smole je i u nestabilnosti boje. Upravo u spoju s TEGDMA, Bowenova smola pokazuje hidrofilna svojstva, zbog čega s vremenom dolazi do diskoloracije (promjena boje) smole.

Osim Bowenove smole, u komercijalnoj upotrebi je i organska matrica od uretan-dimetakrilata (UDMA). Koristi se od 1974.g., a značajke su joj: niža viskoznost od Bowenove smole, ali i smanjena sklonost diskoloraciji.

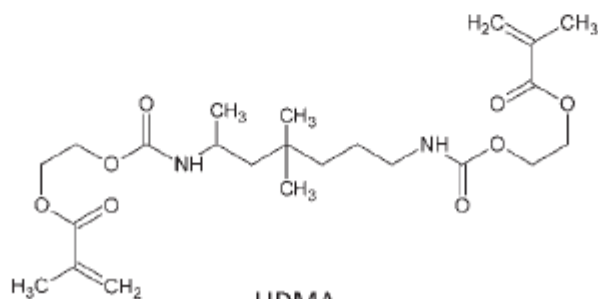
Svaka od ovih matrica ima svoje prednosti i mane, ali do sada nema ni znanstvenih ni kliničkih potvrda da su materijali s jednom matricom bolji od drugih [16]. Osim već navedenih oligomera, koriste se i bisfenol-A-etilmetakrilat (Bis-EMA) te bisfenol-A-propilmetakrilat (Bis-PMA) koji su slične strukture kao i Bis-GMA, ali im je viskoznost niža.



Bis-GMA



TEGDMA



UDMA

Slika 6. Organske matrice dentalnih kompozita [5]

3.2.2 Anorgansko punilo

Za anorgansko punilo rabe se upravo anorganske čestice, koje se dodaju organskoj matrici do njezina zasićenja. Svako od punila koristi se zbog svojih dobrih karakteristika. Borosilikatno staklo, koje ima srednju tvrdoću i radiokompaktnost, te kao i itrijev i iterbijev fluorid mogu ojačati zubno tkivo s obzirom na to da imaju sposobnost otpuštanja fluorovih iona u okoliš. Koristi se i koloidni silicij, čije su čestice manje od 0,1 mikrona, inertne su i imaju nizak koeficijent toplinske ekspanzije, pridonose boljoj kondenzibilnosti i poliranosti kompozitnog materijala. Kvarc je vrlo stabilan, kemijski inertan, visoke tvrdoće, ali se takvi kompozitni materijali teško poliraju, imaju visoki koeficijent toplinske ekspanzije i mogu djelovati abrazivno, premda je upravo on bio najčešće rabljeno punilo tijekom 70-tih godina prošlog stoljeća. Od ostalih čestica koriste se i alumosilikati barija, stroncija, litija, cirkonija i kositra te barijev sulfat.

Čestice anorganskog punila različitih su veličina i oblika, što utječe i na svojstva kompozita. Primjerice, stupanj poliranosti kompozitnog materijala uvjetovan je upravo veličinom čestica punila. Odnosno, lakše je ispolirati kompozitni ispun ukoliko je promjer čestica manji. Fizikalna svojstva kompozita određena su količinom anorganskog punila, koja se obično izražava volumnim udjelom [15]. S određenim limitom, što je viši udio punila, to su bolja fizikalna svojstva kompozitnog materijala (jer je manji udio smole) [12].

3.2.3 *Međugranično vezivno sredstvo*

Kako bi se osigurala trajna veza punila s organskom matricom, koristi se međugranično vezivno sredstvo. U tu svrhu najčešće se koriste spojevi skraćenog naziva silani, čije spojno sredstvo sprječava hidrolitičku degradaciju spoja između punila i smole i omogućuje dobru raspodjelu naprezanja između smole i matrice. Silan (γ -metakriloksipropiltrimetoksisilan) je bifunkcionalna molekula koja se na jednom kraju veže na hidroksilne skupine anorganskog punila reakcijom kondenzacije ostvarujući na taj način siloksanske veze, dok metakrilne skupine na drugom kraju molekule podliježu polimerizaciji pri kemijskoj ili fotokemijskoj aktivaciji otvrdnjavanja kompozita [10].

3.2.4 *Ostale komponente*

Od ostalih komponenata koriste se inicijatori polimerizacije, inhibitori polimerizacije te apsorberi UV-zraka. Inicijatori polimerizacije dodaju se u kompozitnu smjesu kako bi pokrenuli reakciju polimerizacije, odnosno očvršćivanja u kompozitnu tvarinu [17]. Kao izvore slobodnih radikala, za kemijsko stvrdnjavanje smole koriste se benzoil-peroksid i tercijarni amini (*N,N*-dimetil-*p*-toluidin te *N,N*-dihidroksietil-*p*-toluidin), dok se za fotokemijsko stvrdnjavanje koriste fotoaktivatori poput diketona, odnosno kamforkina s tercijarnim alifatskim aminom *N,N*-dimetil-aminoetil-metakrilatom. Oni djeluju na način da pri svjetlu određene valne duljine (primjerice 468 nm) potiču reakciju, pri čemu matrica očvrstne. S obzirom na to da se polimerna matrica može spontano samoočvrstnuti, dodaju se inhibitori polimerizacije koji to sprječavaju. U tu svrhu koriste se monometil-eter i hidrokinon, koji može uzrokovati promjenu ili gubitak boje kompozita. Upravo zbog tog problema, dodaju se i apsorberi UV zraka koji čuvaju postojanost boje kompozita. Najčešće se rabi 2-hidroksi-4-metoksibenzofen [15].

3.2.5 *Vrste dentalnih kompozitnih materijala*

Današnji su materijali poboljšani smanjenjem veličine čestica i većom kakvoćom punila, poboljšanjem adhezije između punila i organske matrice, uvođenjem polimera niske molekularne mase poboljšana je polimerizacija i olakšano rukovanje materijalom. Kako bi se pacijentu olakšao izbor najpogodnijeg materijala, prihvaća se podjela na: tradicionalne kompozitne materijale (makropunjene), mikropunjene kompozitne materijale i hibridne kompozitne materijale. Makropunjeni kompozitni materijali sadržavaju od 70-80% punila, veličine čestica su 20-50 μm , a nedostatak im je obezbojenje i hrapavost. Mikropunjeni kompozitni materijali sadržavaju 35-50% punila, zbog čega imaju malo lošija svojstva od, primjerice, makropunjenih kompozitnih materijala, veličine čestica su 0,02-0,04 μm , a prednost im je estetski izgled i poliranost. Hibridni kompozitni materijali imaju svojstva makropunjenih i mikropunjenih kompozitnih materijala, sadržavaju 70-77% punila, veličine su čestica 0,04-5 μm .

4 NAČIN ISPUNE ZUBA U STOMATOLOGIJI

Razlozi zbog kojih je pacijentima najčešće potrebna plomba (ispuni) su karijes, frakturirani zubi, zubi koji su istrošeni zbog grickanja noktiju, škrgutanja zubima (bruksizam) ili korištenja zubi u neprikladne svrhe (otvaranje boca, skidanja poklopaca zubima i slično) [19].

4.1 Postupak izrade ispuna

Stomatolog pacijenta najprije mora anestezirati, kako bi procedura prošla bezbolno. Zatim, čisti karijes koristeći stomatološku bušilicu na kojoj je montirano svrdlo. Međutim, karijes je moguće ukloniti i pjeskarenjem, piezo uređajima te laserom. Veličina i oblik svrdla određuje se prema veličini i obliku karijesa. U početku, stomatolog koristi turbine, koje dostižu do 200.000 okretaja u minuti, kako bi svrdlom prošao kroz caklinu, tamo napravio otvor i skinuo minimalno cakline koliko je nužno kako bi se karijes dobro vidio. U trenutku kada svrdlo dođe do dentina (sloja zuba ispod cakline), stomatolog počinje koristiti sporiju bušilicu (mikromotor). Nakon toga počinje s čišćenjem karijesa i na kraju postupka koristi sondu i karijes indikator u svrhu provjere je li u potpunosti uklonjen. Kada je sav karijes očišćen, oblikuje se izbušeno područje (kavitet) kako bi se pripremio za ispunu. Različite vrste ispune zahtijevaju različite tipove preparacije kaviteta. Ako je karijes blizu pulpe (šupljina unutar zuba u kojoj se nalazi živac), stavlja se podloga ili liner kako bi se pulpa zaštitila. Podloga se najčešće radi od glassionomer cementa ili cink oksid cementa. Neki od tih materijala otpuštaju fluoride kako bi zaštitili zub od sekundarnog karijesa. Ako stomatolog pacijentu postavlja kompozitnu ispunu (bijelu plombu), prvo će jetkati zub gelom koji sadrži kiselinu. Jetkanjem se povećava hrapavost površine cakline i omogućuje čvrsta veza ispune sa zubom. Nakon toga, na rubove preparacije nanosi posebnu smolu (bond) koja se čvrsto veže sa zubom. Ona je nužna kao među-sloj, da bi se kompozitni materijal vezao za zub; bez smole, ispun bi brzo ispao.

Određene vrste kompozitnih materijala stvrdnjavaju se pod utjecajem plavog svjetla. Plavo svjetlo (valne duljine između 420-470 nm) započinje reakciju polimerizacije (stvrdnjavanja) kompozitne plombe [19].

4.1.1 Amalgamski ispun

Stomatolog će prvo odrediti stomatološku i medicinsku dijagnozu oboljenja, a ukoliko se radi o karijesu, pacijent će morati obaviti klinički pregled i RTG snimku. Na temelju toga, stomatolog prosuđuje zahvaćenost tvrdih zubnih tkiva karijesom i tipom karijesnog procesa. Anestezira pacijenta, zahvaćajući samo mjesto koje obrađuje. Također, mjesto koje obrađuje mora biti suho, što postiže upotrebom svitaka staničevine. Caklinu otvara dijamantnim brusilom turbina, koje može biti kruškolikog, okruglog ili cilindričnog oblika, uz obilno hlađenje vodom. Dentin, koji je promijenjen karijesom, odstranjuje okruglim čeličnim svrdlom s malim brojem okretaja. Caklinske zidove kaviteta obrađuje cilindričnim dijamantnim brusilom na mikromotoru ili turbini uz vodeno hlađenje, zatim ih ispire i čisti mlazom vode te u konačnici ispire 2.5%-tnom otopinom natrijevog hipoklorita. Zaštitnu podlogu dentina stomatolog izrađuje iz stakleno-ionomernog cementa, pazeći da na caklini ne ostaje nimalo cementa. Kruškolikim dijamantnim brusilom u stakleno-ionomernom cementu oblikuje kavitet koji osigurava sidrenje amalgamskom ispunu. Amalgam u kavitet postavlja slojevitom tehnikom, tako da svaki sloj svojom bazom bude kondenziran (zbijen) uz stijenku kaviteta, a vrškom prema središnjem dijelu kaviteta. Za kondenziranje amalgama, bolje je

koristiti nabijače s ravnim čelom, jer okrugli istiskuju amalgam prema van. Završni sloj amalgama treba malo prelaziti rubove kaviteta. Oblikovanje amalgamskog ispuna treba izvoditi prikladnim instrumentima glatkih površina, dok je svjež i podatan za oblikovanje, dok viškove amalgama koji prelaze rubove kaviteta treba odstraniti ostrim instrumentima. Sve površine stomatolog će zagladiti odgovarajućim instrumentima za zaglađivanje amalgama. Završnu obradu poliranja svih površina amalgamskog ispuna, provest će nakon 24 sata metalnim polirerima i odgovarajućim gumicama [20].

4.1.2 Kompozitni ispun

Stomatolog će otvoriti kavitet okruglim ili cilindričnim dijamantnim brusilom na turbini uz obilno vodeno hlađenje. Zatim će odstraniti karijesni sadržaj okruglim čeličnim svrdlom s malim brojem okretaja mikromotora, također uz vodeno hlađenje. Odstranjivanje karijesnog dentina završit će ručnim ekskavatorom do tvrdog sklerotičnog dentina. Konačni oblik kaviteta, ovisno o razredu, oblikovat će kruškolikim dijamantnim brusilom. Nakon toga, kavitet će isprati mlazom vode i lagano prosušiti suhim zrakom bez kapljica vode ili ulja, ali ne smije ga presušiti. Zatim će nanijeti kiselinu (ortofosfornu ili poliakrilnu) i isprati, ali ga neće dezinficirati natrijevim hipokloritom, jer ometa stvaranje hibridnog sloja. Ukoliko pacijent ima duboki kavitet I. razreda, stomatolog će ili kondicionirati dentin i postaviti zaštitnu dentinsku podlogu od stakleno-ionomernog cementa, kojom se prekriva sav dentin, ili će potpuno jetkati (*total etch* tehnika) sve površine kaviteta (cakline i dentina) 37%-tnom otopinom ortofosforne kiseline. Nakon toga će potpuno isprati vodenim mlazom sav kiseli sadržaj iz kaviteta i lagano posušiti (ne presušivati), kako bi osigurao vezivanje s vlažnom površinom kolagena („wet-bonding“). Sve površine premazat će jednim od dostupnih suvremenih dentinskih adheziva postavljanjem na zidove kaviteta i ostaviti do 20 sekundi, a zatim će mlazom zraka lagano odstraniti višak adheziva s površine tako da ostane sjajna površina. Ovisno o naputcima proizvođača, dentinski adheziv treba osvijetliti i polimerizirati odgovarajućim izvorom svjetlosti; ako je sloj adheziva tanji od 20 mikrona, kisik iz zraka može inhibirati polimerizaciju pa je potrebno nanijeti na adheziv tanki sloj tekućeg kompozita pa potom polimerizirati. Kod kaviteta III. i IV. razreda obavezno treba rabiti prikladnu celuloidnu matricu i interdentalne drvene ili plastične reflektirajuće klinove za učvršćivanje matrice i davanje odgovarajućih oblika u cervikalnom području. U male kavitete (pliće od 2 mm), kompozitni materijal se može postaviti u jednom komadu (*bulk* tehnika) i polimerizirati 40 sekundi ili manje, ako to proizvođač zahtijeva. U sve ostale kavitete koji su dublji, obavezno je kompozitni materijal unositi u slojevima koji ne smiju biti deblji od 2 mm, i svaki sloj treba posebno polimerizirati 40 sekundi. Završni sloj treba dodatno polimerizirati još 40 sekundi. Višak materijala će odstraniti prikladnim dijamantnim brusilom, artikulacijskim papirom će registrirati prerane kontakte i odstraniti ih dijamantnim brusilom. Plavim artikulacijskim papirom provjerit će i označiti okluzijske točkaste odnose, a crvenim artikulacijskim papirom klizne artikulacijske zapreke, te ih odstraniti dijamantnim brusilom. Gumicom za poliranje provest će početno poliranje svih površina kompozitnog ispuna, a zelenom silikonskom gumicom za poliranje provest će završno poliranje svih površina ispuna. Aproksimalne površine obradit će interdentalnim metalnim i poliesterskim brusnim vrpčama, a zatim interdentalnim koncem provjeriti aproksimalne površine ispuna i kontaktne odnose. Završno, sve rubove kompozitnog ispuna premazat će caklinsko-dentinskim adhezivnim sredstvom i polimerizirati [20].

4.2 Nakon izrade ispuna

Nakon izrade ispuna pacijentu zub može biti osjetljiv na pritisak, zrak, slatku hranu, toplo i hladno. Preosjetljivost je najčešća kod bijele plombe, ali je moguća i kod amalgamske plombe. U većini slučajeva, preosjetljivost prolazi nakon 7 do 14 dana. Također, moguće je da pacijent osjeća nelagodu pri zagrizu. Jedan uzrok tome je previsoki ispun, koji smeta prilikom zagriža, a drugi je proizvodnje električne struje u ustima zbog dodira dvaju metala (jedan je novi amalgamski ispun); primjerice novi amalgam je u donjoj čeljusti, a zlatna krunica je u gornjoj [19].



Slika 7. Primjer ispune od a) kompozitnog materijala [21], i b) dentalnog amalgama [22]

4.3 Zamjena starih ispuna

Pri žvakanju, javljaju se velike sile, uslijed čega se pojedini ispuni mogu istrošiti, te se moraju zamijeniti. Ispun se mora zamijeniti i ranije ako ispadne, dođe do frakture ili rubnog propuštanja. Ispuni mogu ispasti iz nekoliko razloga. Primjerice, ako pacijent prejako zagriže na zub s velikim ispunom, može slomiti ispun i/ili zub. Također, ukoliko ispun zamjenjuje samo dio zuba (npr. slomljen je velik dio prednjeg zuba), pri snažnom zagrizu, može doći do puknuća ispune i preostalog zuba. Posljednji razlog je u neispravnom postavljanju ispuna; to jest, ako je brušeni zub bio kontaminiran slinom prije postavljanja trajnog ispuna, veza između zuba i ispuna neće biti dovoljno snažna i ispun bi mogao ispasti.

Amalgamski i kompozitni ispuni mogu napuknuti, a to se može dogoditi ili vrlo brzo nakon postavljanja ispuna ili nakon dugo vremena. Ispun može napuknuti vrlo brzo nakon postavljanja ako je viši od okolne zdrave zubne supstancije, te mora izdržati većina žvačnih sila.

Za ispun se kaže da propušta, kada rubovi ispuna ne priliježu dobro uz rubove zuba. Ostaci hrane i bakterija mogu ući ispod neadekvatnog ispuna. Budući da ih pacijent ne može očistiti, bakterije se razmnožavaju na ostacima hrane i stvaraju kiselinu koja uzrokuje karijes. I amalgamski i kompozitni ispuni mogu propuštati. Kompozitni ispun može biti kontaminiran slinom, što dovodi do slabije veze između kompozita i zuba, te omogućuje rubno propuštanje. Ponekad mogu biti prisutne i male pukotine na rubovima ispuna. Takve pukotine nastaju prilikom polimerizacije, kada dolazi do kontrakcije ispuna nakon polimerizacije [19].

5 ANALITIČKI MODEL

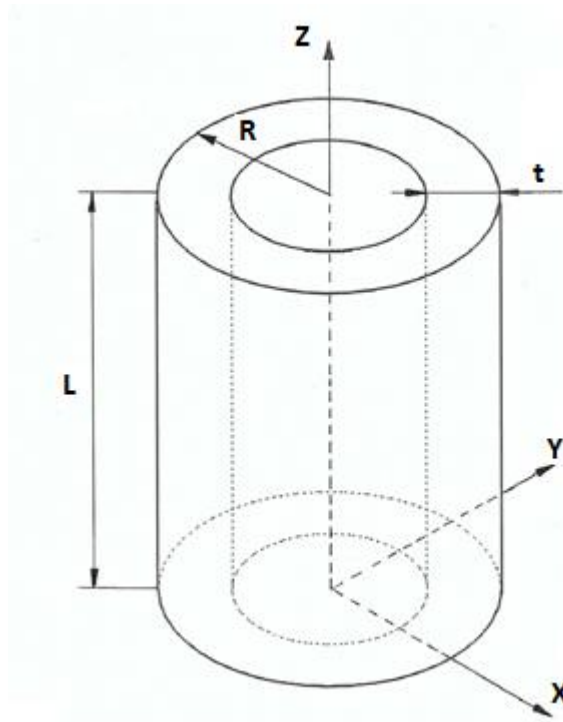
5.1 Hookeov zakon za prostorno (troosno) stanje naprezanja tijela

Promatramo li zub kao cijev debljine zida t , visine L i polumjera R u kojoj se nalazi ispuna u obliku valjka, jednadžbe Hookeovog zakona, koje povezuju naprezanja, deformacije i promjenu topline mogu se napisati kao:

$$\varepsilon_{isx} = \frac{\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)}{E_{is}} + \alpha_{is} \Delta T \quad (1)$$

$$\varepsilon_{isy} = \frac{\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)}{E_{is}} + \alpha_{is} \Delta T \quad (2)$$

gdje se indeks is odnosi na materijale ispune, a ε predstavlja deformaciju, σ je naprezanje, α je koeficijent toplinskog rastezanja, E je modul elastičnosti i ΔT predstavlja promjenu temperature.



Slika 8. Skica zuba s ucrtanim kordinatnim osima

Naprezanje u pravcu osi z zanemarujemo zbog otvorenosti ispune s jedne strane $\sigma_z = 0$. Zbog cilindrične geometrije, izotropnosti materijala, deformacije u pravcu osi x i y bit će jednake $\varepsilon_x = \varepsilon_y$.

U cilindričnom kordinatnom sustavu promatraju se cirkularna i radijalna deformacija koje su u ovom slučaju jednake, i iznose:

$$\varepsilon_{is} = \frac{\sigma_{is}(1 - \nu)}{E_{is}} + \alpha_{is} \Delta T \quad (3)$$

Promatrajući zub, može se pretpostaviti da ima obliku šupljeg valjka s tankim stijenkama, pa je radijalna deformacija zanemariva, dok je tangencijalna (cirkularna) komponenta deformacije jednaka:

$$\varepsilon_d = \frac{\sigma_d}{E_d} + \alpha_d \Delta T \quad (4)$$

gdje se d odnosi na materijal zuba, odnosno na zubnu kost (dentin). Kako između zuba i zubne ispune nema šupljina, mora biti $\varepsilon_{is} = \varepsilon_d$ tj.

$$\frac{\sigma_{is}(1 - \nu)}{E_{is}} + \alpha_{is} \Delta T = \frac{\sigma_d}{E_d} + \alpha_d \Delta T \quad (5)$$

kako je:

$$\sigma_{is} = \frac{F}{2r\pi h} \quad (6)$$

gdje je r polumjer šupljine zuba, h je duljina (visina) ispuna, F je sila kojom plomba djeluje na zub. Dok je σ_d :

$$\sigma_d = \frac{N}{t} \quad (7)$$

gdje je t debljina stijenke zuba, a N cirkularna sila:

$$N = p \cdot r \frac{F}{2t\pi h} \cdot r \quad (8)$$

pa slijedi:

$$\sigma_d = \frac{r}{t} \frac{F}{2r\pi h} = \frac{F}{2t\pi h} \quad (9)$$

uvrštavanjem (6) i (9) u (5) dobivamo:

$$\frac{\frac{F}{2r\pi h}(1 - \nu)}{E_{is}} + \alpha_{is} \Delta T = \frac{\frac{F}{2t\pi h}}{E_d} + \alpha_d \Delta T \quad (10)$$

pa slijedi:

$$\frac{F(1 - \nu)}{2\pi r h E_{is}} - \frac{F}{2\pi t h E_d} = \alpha_d \Delta T - \alpha_{is} \Delta T \quad (11)$$

izlučivanjem F dobivamo:

$$F \left[\frac{(1-\nu)}{2\pi r h E_{is}} - \frac{1}{2\pi t h E_d} \right] = \Delta T (\alpha_d - \alpha_{is}) \quad (12)$$

pa slijedi:

$$F = \frac{\Delta T (\alpha_d - \alpha_{is})}{\left(\frac{(1-\nu)}{2\pi r h E_{is}} - \frac{1}{2\pi t h E_d} \right)} = \frac{\Delta T (\alpha_d - \alpha_{is})}{\frac{1}{2\pi h} \left(\frac{(1-\nu)}{r E_{is}} - \frac{1}{t E_d} \right)} \quad (13)$$

pa konačno dobivamo:

$$F = \frac{2\pi h \Delta T (\alpha_{is} - \alpha_d)}{\frac{1}{t E_d} - \frac{(1-\nu)}{r E_{is}}} \quad (14)$$

5.2 Izračun sile pritiska ispune amalgama na zub

Ako je poznato: duljina šupljine zuba ($h = 1$ do 5 mm), debljina stijenke zuba $t = 1$ mm, modul elastičnosti amalgama $E_{am} = 27000$ MPa, modul elastičnosti zuba (dentina) $E_d = 20000$ MPa, koeficijent toplinskog rastezanja amalgama $\alpha_{am} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, koeficijent toplinskog rastezanja zuba (dentina) $\alpha_d = 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Poissonov faktor $\nu = 0.33$, temperaturne promjene $\Delta T = 45^\circ\text{C}$, sila pritiska ispune na zub iznosi:

$$h = 1 \text{ mm}$$

$$F = \frac{2\pi h \Delta T (\alpha_{is} - \alpha_d)}{\frac{1}{t E_d} - \frac{(1-\nu)}{r E_{is}}} = \frac{2\pi \cdot 1 \cdot 45 (25 \cdot 10^{-6} - 11 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{1 \cdot 20000} - \frac{(1-0,33)}{3 \cdot 27000}}$$

$$F_{(h=1\text{mm})} = 94,86 \text{ N}$$

$$h = 2 \text{ mm}$$

$$F = \frac{2\pi h \Delta T (\alpha_{is} - \alpha_d)}{\frac{1}{t E_d} - \frac{(1-\nu)}{r E_{is}}} = \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 45 (25 \cdot 10^{-6} - 11 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{1 \cdot 20000} - \frac{(1-0,33)}{3 \cdot 27000}}$$

$$F_{(h=2\text{mm})} = 189,72 \text{ N}$$

$$h = 3 \text{ mm}$$

$$F = \frac{2\pi h \Delta T (\alpha_{is} - \alpha_d)}{\frac{1}{t E_d} - \frac{(1-\nu)}{r E_{is}}} = \frac{2\pi \cdot 3 \cdot 45 (25 \cdot 10^{-6} - 11 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{1 \cdot 20000} - \frac{(1-0,33)}{3 \cdot 27000}}$$

$$F_{(h=3\text{mm})} = 284,58 \text{ N}$$

$$h = 4 \text{ mm}$$

$$F = \frac{2\pi h \Delta T (\alpha_{is} - \alpha_d)}{\frac{1}{tE_d} - \frac{(1-\nu)}{rE_{is}}} = \frac{2\pi \cdot 4 \cdot 45(25 \cdot 10^{-6} - 11 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{1 \cdot 20000} - \frac{(1-0,33)}{3 \cdot 27000}}$$

$$F_{(h=4mm)} = 379,44 \text{ N}$$

$$h = 5 \text{ mm}$$

$$F = \frac{2\pi h \Delta T (\alpha_{is} - \alpha_d)}{\frac{1}{tE_d} - \frac{(1-\nu)}{rE_{is}}} = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 45(25 \cdot 10^{-6} - 11 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{1 \cdot 20000} - \frac{(1-0,33)}{3 \cdot 27000}}$$

$$F_{(h=5mm)} = 474,31 \text{ N}$$

5.3 Izračun sile pritiska ispune akrilne smole na zub

Ako je poznato: duljina šupljine zuba ($h = 1$ do 5 mm), debljina stijenke zuba $t = 1 \text{ mm}$, modul elastičnosti akrilne smole $E_{as} = 2500 \text{ MPa}$, modul elastičnosti zuba (dentina)

$E_d = 20000 \text{ MPa}$, koeficijent toplinskog rastezanja akrilne smole $\alpha_{as} = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, koeficijent toplinskog rastezanja zuba (dentina) $\alpha_d = 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Poissonov faktor $\nu = 0.33$, temperaturne promjene $\Delta T = 45^\circ\text{C}$, sila pritiska na zub poprima vrijednosti:

$$h = 1 \text{ mm}$$

$$F = \frac{2\pi h \Delta T (\alpha_{is} - \alpha_d)}{\frac{1}{tE_d} - \frac{(1-\nu)}{rE_{is}}} = \frac{2\pi \cdot 1 \cdot 45(2.5 \cdot 10^{-6} - 11 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{1 \cdot 20000} - \frac{(1-0,33)}{3 \cdot 2500}}$$

$$F_{(h=1mm)} = 61,10 \text{ N}$$

$$h = 2 \text{ mm}$$

$$F = \frac{2\pi h \Delta T (\alpha_{is} - \alpha_d)}{\frac{1}{tE_d} - \frac{(1-\nu)}{rE_{is}}} = \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 45(2.5 \cdot 10^{-6} - 11 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{1 \cdot 20000} - \frac{(1-0,33)}{3 \cdot 2500}}$$

$$F_{(h=2mm)} = 122,20 \text{ N}$$

$$h = 3 \text{ mm}$$

$$F = \frac{2\pi h \Delta T (\alpha_{is} - \alpha_d)}{\frac{1}{tE_d} - \frac{(1-\nu)}{rE_{is}}} = \frac{2\pi \cdot 3 \cdot 45(2.5 \cdot 10^{-6} - 11 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{1 \cdot 20000} - \frac{(1-0,33)}{3 \cdot 2500}}$$

$$F_{(h=3mm)} = 183,30 \text{ N}$$

$$h = 4 \text{ mm}$$

$$F = \frac{2\pi h \Delta T (\alpha_{is} - \alpha_d)}{\frac{1}{tE_d} - \frac{(1-\nu)}{rE_{is}}} = \frac{2\pi \cdot 4 \cdot 45(2.5 \cdot 10^{-6} - 11 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{1 \cdot 20000} - \frac{(1-0,33)}{3 \cdot 2500}}$$

$$F_{(h=4mm)} = 244,41 \text{ N}$$

$$h = 5 \text{ mm}$$

$$F = \frac{2\pi h \Delta T (\alpha_{is} - \alpha_d)}{\frac{1}{tE_d} - \frac{(1-\nu)}{rE_{is}}} = \frac{2\pi \cdot 5 \cdot 45(2.5 \cdot 10^{-6} - 11 \cdot 10^{-6})}{\frac{1}{1 \cdot 20000} - \frac{(1-0,33)}{3 \cdot 2500}}$$

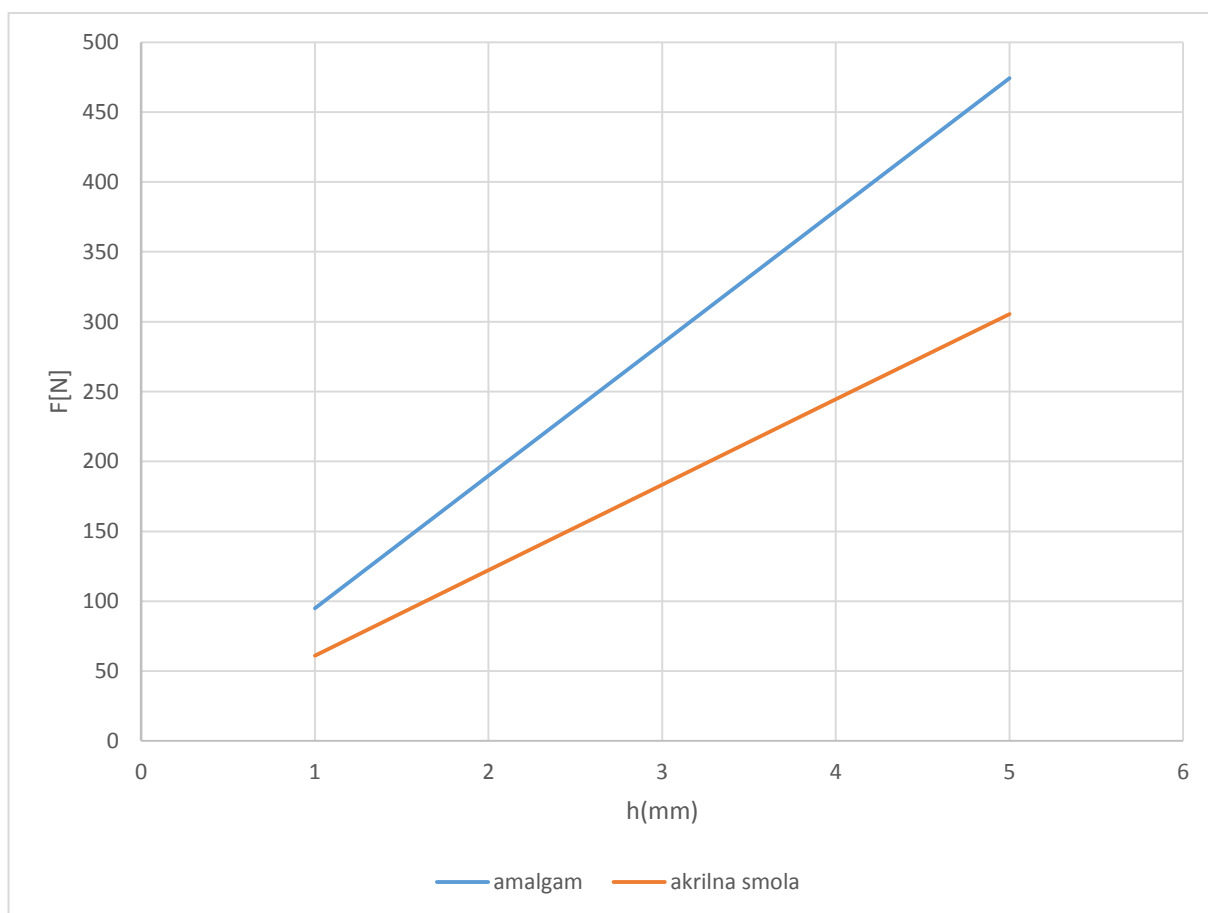
$$F_{(h=5mm)} = 305,51 \text{ N}$$

5.4 Rezultati

Rezultati su prikazani tablično i dijagramom.

Tablica 1. Sile pritiska ispuna amalgama i akrilne smole na zub

	$h = 1 \text{ mm}$	$h = 2 \text{ mm}$	$h = 3 \text{ mm}$	$h = 4 \text{ mm}$	$h = 5 \text{ mm}$
$F_{amalgam} [N]$	94,86	189,72	284,58	379,45	474,31
$F_{akrilne smole} [N]$	61,10	122,20	183,30	244,41	305,51



Slika 9. Grafički prikaz promjene sile pritiska ispune na zub ovisno o duljini šupljine zuba za amalgam i akrilnu smolu

6 ZAKLJUČAK

Kompozitni materijali danas su potpuno zamijenili dentalne amalgame i to zbog: estetike, niske toplinske vodljivosti, mehaničke adhezije za tvrdo zubno tkivo, lakšeg rukovanja, mogu ojačati tvrdo zubno tkivo, a i ne sadrže živu. Kompoziti imaju i neke nedostatke, kao što je dulje vrijeme pripreme, stezanje prilikom polimerizacije, što može uzrokovati naprezanje te malo kraće vrijeme upotrebe. Zbog toga se intenzivno istražuju novi kompozitni materijali koji će ukloniti navedene nedostatke [13].

U ovom radu promatrane su sile koje se ostvaruju između ispune i zuba, a ispune su bile načinjene od amalgama i akrilne smole. Prednosti akrilne smole u usporedbi sa amalgamom su: estetika, niska toplinska provodljivost, mehanička adhezija za zubnu strukturu, nema žive ni galvanizma, štedi zubnu strukturu, može ojačati zubnu strukturu i lako se modelira prije polimerizacije. Nedostaci u odnosu na amalgam su: duže vrijeme za aplikaciju, nastanak mikro-pukotina, pojava poslije-restoracijske osjetljivosti [14]. Sile između amalgamske ispune i zuba veće su od sila između akrilne smole i zuba. S porastom duljine šupljine zuba h rastu i sile između ispune i zuba, što je prikazano i grafički na slici 9.

Vidljivo je da sile između ispune i zuba rastu linearno, to jest proporcionalno s rastom duljine šupljine zuba. Ispune zuba s amalgamom ostvaruju veće sile pritiska ispune na zub, za razliku od ispuna s akrilnim smolama.

Intenzivna istraživanja dovode do razvoja novih kompozitnih materijala (akrilnih smola) koji će ukloniti navedene nedostatke postojećih akrilnih smola i približiti se prednostima amalgama. Iz tog razloga kompozitni materijali imaju sve veću uporabu na tržištu, dok se amalgam polako istiskuje iz upotrebe.

7 LITERATURA

- [1] *ljudski organi po regijama* <http://nature-is-here.blog.hr/index.2.html>, 06.02.2016.
- [2] *Kompozitni ispuni* <http://www.intradent.hr/kompozitni-ispuni/>, 06.02.2016.
- [3] *Zubni ispuni* <http://www.viadent.hr/hr/zubni-ispuni/5/5>, 06.02.2016.
- [4] Perović, D., *Anatomija čovjeka I dio*, Medicinska knjiga, 1966.
- [5] *Anatomy of a tooth*, <https://culpepperdds.wordpress.com/basic-tooth-anatomy/>, 06.02.2016.
- [6] <http://cdn.roditelji.me/wp-content/uploads/2014/03/zubi1.jpg?983522>, 06.02.2016.
- [7] <http://www.mojstomatolog.com.hr/razvoj-zuba/>, 06.02.2016.
- [8] *Tooth development*, http://www.smilemidland.com/tooth_development.html, 06.02.2016.
- [9] *Dentalni amalgam*
https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwi7nPqr9fPOAhVH2SwKHdKoCIAQFggZMAA&url=http%3A%2F%2Fhrcak.srce.hr%2Ffile%2F146375&usg=AFQjCNFI7In9V2IH2tAJX5kfS_Z7dJvsng&sig2=ITA4-gWBYanbK2tN2jx8Zg&bvm=bv.131783435,d.bGg&cad=rja 13.07.2016.
- [10] Jerolimov, V. i sur.: *Osnove stomatoloških materijala, skripta*, Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2005. 179-200.
- [11] *Toksičnost dentalnog amalgama*
<https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwi7nPqr9fPOAhVH2SwKHdKoCIAQFggiMAE&url=http%3A%2F%2Fhrcak.srce.hr%2Ffile%2F146361&usg=AFQjCNHYCUvAko5hbJewuaiVsf3GB0MsXw&sig2=webL99o2uupYhata0B3fsA&bvm=bv.131783435,d.bGg&cad=rja> 13.07.2016.
- [12] *Direktne rekonstrukcije zubne plombe*, <http://www.mojstomatolog.com.hr/direktne-restauracije-zubne-plombe/> 13.07.2016.
- [13] *Kompozitni materijali u stomatologiji, Priredio: Ivan Štefanac*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu
https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwi3uPG-s_DKAhVDBSwKHdIgBDYQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fhrcak.srce.hr%2Ffile%2F11

[6686&usg=AFQjCNFl1jX2pqLjfLpsLpp-](#)

[94S2kB8aoQ&sig2=BCD6G7Mkb0mnpk_ah9rxJQ&cad=rja](#), 06.02.2016

[14] Kompozitni materijali, <https://www.sfzg.unizg.hr/download/repository/kompoziti.pdf>
06.02.2016.

[15] Knežević, A., Tarle, Z.: *Kompozitni materijali*, skripta, Stomatološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2005.

[16] Peutzfeld, A.: Resin composites in dentistry: the monomer systems, *European Journal of Oral Sciences*, 105(1997), 97-116.

[17] <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3491332/> 13.07.2016.

[18] Igor Balać, Branko Bugarski, Irena Ćosić, Miroslav Dramićanin, Drago Đorđević, Nenad Filipović, Nenad Ignjatović, Đorđe Janačković, Miloš Kojić, Verica Manojlović, Zoran Marković, Bojana Obradović, Ivana Pajić Lijaković, Miodrag Pavlović, Milenko Plavšić, Vladimir Ranković, Boban Stojanović, Vladimir Trajković, Uskoković, Dragan, Petar Uskoković, Dejan Veljković, Ivo Vlastelica, Gordana Vunjak Novaković *Biomaterijali*, Beograd (2010), 839-840.

[19] *Procedura izrade ispuna*, <http://stomatologija.hr/node/15>, 06.02.2016.

[20] *Naputci za praktičan rad - restorativni postupci*
https://www.sfzg.unizg.hr/download/repository/naputci_restorativa.pdf, 06.02.2016.

[21] *Zubni ispuni* <http://www.viadent.hr/hr/zubni-ispuni/5/5>, 06.02.2016.

[22] *Dentalni amalgam*, <http://www.zoniesholgado.com/images/cerec1.jpg>, 06.02.2016.

[23] Ivo Alfrević, *Nauka o čvrstoći*, Golden marketing 1989.

[24] *Drvo znanja*, broj 99, studeni 2006.g